

サイホン排水システムに関する実験的研究

(その5) CFDを用いたサイホン排水配管の流れ特性および流速式の検討

Experimental Studies on the Siphon Drainage System

(Part 5) Studies on Characteristics of Filled Flow and Velocity Equation in Siphon Drainage Piping with CFD

正会員 ○光永 威彦 (山下設計) 正会員 坂上 恭助 (明治大学)
 正会員 塚越 信行 (明治大学) 正会員 酒井 孝司 (明治大学)

Takehiko MITSUNAGA*¹ Kyosuke SAKAUE*² Nobuyuki TSUKAGOSHI*² Koji SAKAI*²

*¹ Yamashita Sekkei, Inc. *² Meiji University

In the previous report, we studied the discharge characteristics of foundational siphon drainage system which didn't have a trap or cross piping. In this paper, we recreated siphon drainage systems in previous paper (Part4) using CFD (Computational Fluid Dynamics). And these conclusions were compared to the characteristics of filled flow in previous paper. Consequently, we confirmed the validity of CFD analysis, and studied the characteristic of filled flow in various piping.

はじめに

前報¹⁾では、トラップや跨ぎ配管のない最も基礎的な配管モデル（以下、サイホン排水基本配管モデルという）と、実施工を想定して配管トラップ等を設置した配管モデル（以下、サイホン排水配管トラップモデルという）において、サイホン排水システムの流れ特性と間欠サイホンの挙動について検討を行った。これより、運動エネルギー保存則から導出した理論式と、実験式を比較し、同システムにおける管内流速式の提案を行った。

本報では、近年、急速に発展し、各分野で利用されている数値流体力学 (CFD; Computational Fluid Dynamic)^{2,3)}を用いて、前報で行った実験の再現を試みた。これより、CFD解析が、本研究対象における水-空気の二相流の解析ツールとして有効性について検討した。さらに、室内では実験困難な配管形状モデルを解析し、多様な配管における流れ特性の検討を行った。

1. サイホン排水基本配管モデルにおけるCFDの試行

1.1 解析目的

建築環境分野（熱・空気）で広く利用されているCFD解析を用いて、サイホン排水システム特有の満流排水によるサイホン現象を再現性の検証を行う。

このとき、流体は水-空気の混相流とし、固形物のない清水とした。また、本報の解析には、汎用流体解析ツールSTAR-CD (ver.3.24)を用いた。

1.2 解析概要

本解析の配管モデルは、前報のトラップや跨ぎ配管を有しないサイホン排水基本配管モデルに準拠して作成した(図1)。また配管寸法は、表1に示す通り水平管長から自由表面までの流入水頭 H_i : 700mm、水平管長 L_h :

4,000mmとし、流出水頭 H_o : 500・1,000・1,500mmの計3通りとした。

計算領域は、図1において初期充水した排水器具自由表面から流出水頭の開放端までの領域とした。これより、サイホンによる管内流速がシステム最大となるまでの時間を短縮し、CFD解析における計算負荷を軽減させた。

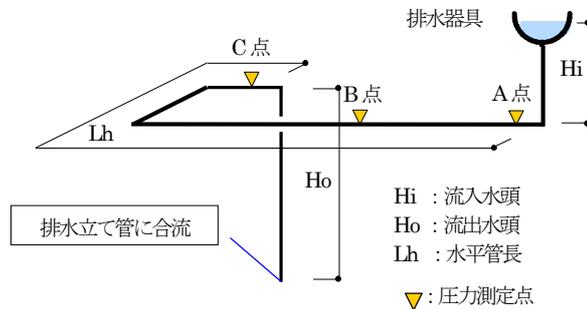


図1 サイホン排水基本配管モデルの概要

表1 試行CFDにおける配管寸法・形態

解析No	水平管長 [mm]	流出水頭 [mm]	全管長 [mm]	水平曲り数 [-]
AN40-5	4,000	500	5,200	2
AN40-10		1,000	5,700	2
AN40-15		1,500	6,200	2

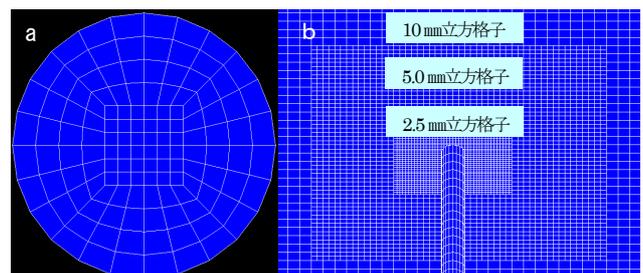


図2 解析モデルの格子概要 (a : 断面, b : 接合部)

サイホン排水配管における断面の構成格子数は 132 とした (図 2-a)。高さ方向は 10mm で等分割した。さらに、貯水桝の格子サイズは、最大を 10mm 立方とし、サイホン排水配管の合流部へ向かって細分化を行い、最小で 2.5mm 立方とした (図 2-b)。格子総数は、最小 144,128 メッシュ、最大 157,592 メッシュとなった。

解析条件を表 2 に示す。本解析は、等温・非定常流れ場で水-空気の混相流とし、自由表面の計算手法には、オイラー的手法である VOF (Volume-of-Fluid) 法⁴⁾を用いた。解法は PISO とし、差分スキーム (移流項) は、流れが一方向であることから、一次精度の風上差分を用いた。壁面境界条件は、一般化対数則とした。また、実験結果から管内レイノルズ数 Re が $10^4 \sim 10^5$ 程度の乱流域と予測できることから、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを適用した。また、計算時間刻みは、2ms とした。実時間で 5.0 秒分の計算を行った。

このとき、本報における解析による管内流速は、管内から流出する配管末端の断面を格納した後、各セルにおける接線方向の流速を抽出し、充水率 (ボイド率) に応じて水の比重を積算して求めた質量流量より、断面平均流速を算出した。

1.3 解析結果と考察

最大クーラン数は、いずれの解析モデルにおいても、約 4.0 以下となった。これは本解析の時間解法 (完全陰解法) において十分な値といえる。さらに、壁面第一セルの y^+ は、約 150 となった。これは乱流域 ($y^+ > 30$) に位置しており、本解析における計算方法は適切であったと考えられる。

解析結果を表 3 に示す。流速値および圧力値は、定常状態時とした。解析による流速は、実験値との差異が約 5% となり、また、管内圧力は、最大で約 500Pa の差異となった。これは、圧力センサーの分解能を鑑みると、有効な結果であると考えられる。

流出水頭 Ho : 1,500mm における管内平均流速と管内圧力の過渡分布を図 3 に示す。流出開始後 1~2 秒は、管内平均流速の分布が、実験値 v_e と解析値 v_a で最大で 0.5m/s の差異がみられた。これは、時間刻みにおける収束回数 (最大コレクター数 50 回) に至ったための打ち切り誤差が影響しているものと考えられる。しかし、流速が一定の値に安定する流出開始後 2.5 秒以降は、極めて実験と近い流速値を示した。また、管内圧力においては、サイホン現象による管内の急激な負圧においても、その再現性は良好であった。

さらに、解析における管内平均流速を前報 (その 4) の水平管長 Lh : 4,000mm における実験値および理論値と比較した (図 4、図 5)。ともに決定係数も高く、実験値および理論値と極めて近い値を示した。

表 2 解析条件

流れ場	等温・非定常
計算手法	自由表面流れ (VOF 法)
流体	第 1 流体: 空気, 第 2 流体: 水
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
解法	PISO (最大コレクター数: 50, 緩和係数: 0.8)
差分スキーム	CICS (VOF), 風上差分 (移流項), 中心差分 (その他)
境界条件	一般化対数則
時間刻み	2ms (500Hz)
計算機	Xeon3.20GHz/L3:1MB 2GB メモリ

表 3 サイホン排水基本配管モデルにおける試行 CFD の解析結果

Ho	500 [mm]		1,000 [mm]		1,500 [mm]		
算出方法	解析	実験	解析	実験	解析	実験	
流速 [m/s]	1.59	1.67	1.89	1.81	2.10	2.02	
圧力 [Pa]	A	2,567	2,478	1,403	1,602	358	191
	B	245	56	-1,791	-1,956	-3,160	-3,188
	C	-3,594	-3,954	-7,206	-7,770	-10,306	-10,88

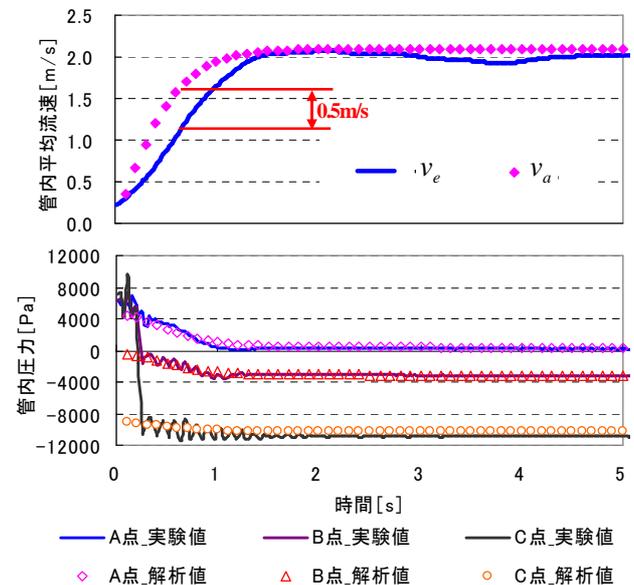


図 3 サイホン排水基本配管モデルの流れ特性の実験と解析の比較 (水平管長 : 4,000 mm、流出水頭 : 1,500 mm)

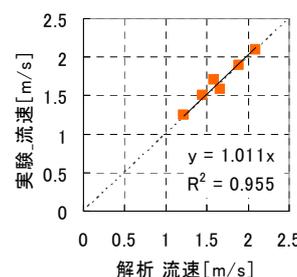


図 4 解析と実験の流速

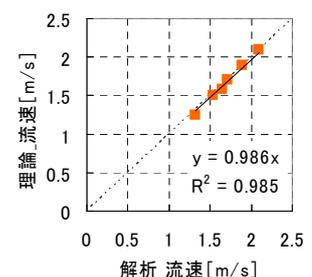


図 5 解析と理論の流速

以上より、本解析条件において、CFD 解析が有効であることが確認できた。

2. CFDを用いたサイホン排水基本配管モデルの流れ特性

2.1 解析目的

前節での CFD による良好な解析結果を受けて、本節では、室内で実験困難な配管形状で解析し、多様な配管における流れ特性を検討する。

2.2 解析概要

本解析の配管形状の流入水頭 H_i は前節と同様とし、水平管長 L_h : 2,000・4,000・8,000・12,000mm の4通り、流出水頭 H_o : 0・500・1,000・1,500・2,000・2,500mm の6通りの計24通りとした。

断面格子の構成および解析条件は、前節と同様とした。格子総数は、最小111,392メッシュ、最大274,412メッシュとなった。

2.3 解析結果と考察

前配管形状における管内流速を表4に示す。また、解析結果より水平管長と管内流量の関係を図6に示す。これより、一般の住宅において問題を生じないと考えられる q_d 値⁴⁾0.5l/sを得るためには、流入水頭 H_i : 700mmにおいて、 L_h : 2,000mmの場合は、 H_o の最小値は0mmを許容し、 L_h : 12,000mmの場合は、 H_o の最小値は2,000mmであれば問題ないと推定される。

このことから水平管長 L_h が、概ね15m以上長くなると、1層分の階高による H_o のサイホン力だけでは、十分な排水能力を得ることが困難であり、サイホン力のほかに、搬送力が必要となる可能性が高いと考察される。

前報(その4)において運動エネルギー保存からの導出した理論流速 v_t と解析流速 v_a および実験流速 v_e との比較を行った(図7)。解析による回帰係数は、4.33となり、理論式の比例定数4.43、および実験による回帰係数4.22と、極めて近い値を示した。

さらに、本解析による流速結果を実験値および理論値と比較した(図8、図9)。ともに決定係数も高く、適切な解析であったことが確認できた。

3. CFDを用いた配管トラップ排水配管モデルの流れ特性

3.1 解析目的

実施工を想定して、配管トラップを設置した配管モデルにおける流れ特性の検討を行う。これより、曲り部の多数ある配管モデルにおける CFD 解析の有効性を確認するとともに、局部抵抗を考慮したサイホン排水配管の流れ特性の把握の拡充を目的とする。

3.2 解析概要

本解析の配管形状は、流入水頭 H_i : 700mm、水平管長 L_h : 4,000mmとし、流出水頭 H_o : 0・500・1,000・1,500・2,000・2,500mmの計6通りで、配管トラップ(通水路長500mm、封水深50mm)を有するサイホン排水配管トラ

表4 全配管形状における流速

流速 [m/s]	流出水頭 [mm]					
	0	500	1,000	1,500	2,000	2,500
2,000	1.60	1.98	2.28	2.51	2.69	2.84
4,000	1.24	1.59	1.90	2.10	2.28	2.43
8,000	0.94	1.25	1.51	1.70	1.87	2.02
12,000	0.75	1.00	1.21	1.41	1.61	1.73

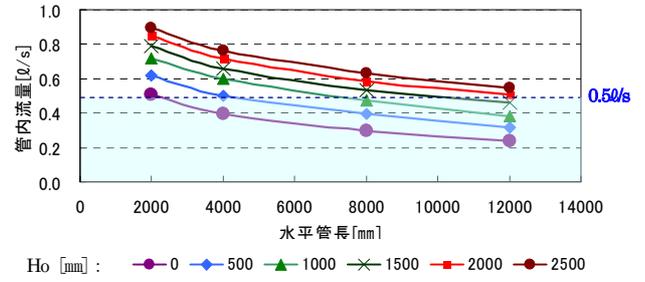


図6 流出水頭 H_o と水平管長による管内流量

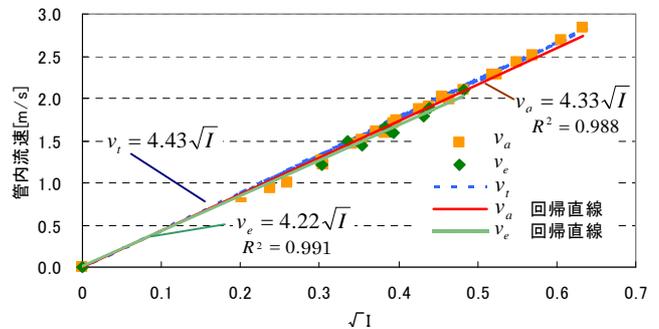


図7 動水勾配 I の平方根と $v_a \cdot v_e \cdot v_t$ の比較

(サイホン排水基本配管モデル)

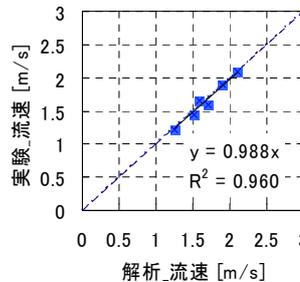


図8 解析と実験の流速

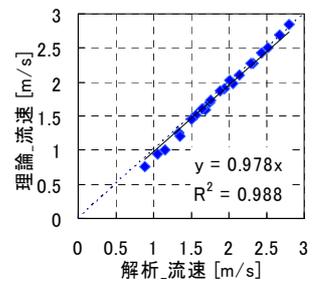


図9 解析と理論の流速

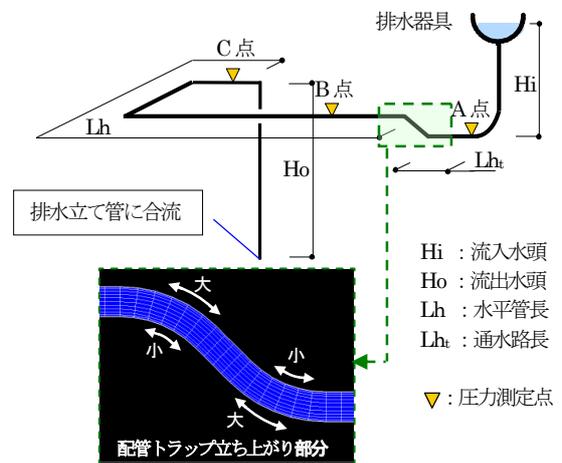


図10 サイホン排水配管トラップモデルの概要

ップモデルを作成した (図 10)。

計算領域は、初期充水されている領域とした。トラップの立ち上がり部は、管長方向に 8 mm 刻みとし、直管部分の 10 mm より若干細分化した。断面格子の構成、解析条件および管内流速の算出方法は、前節と同様とした。このときの格子総数は、最小 146,372 メッシュ、最大 179,900 メッシュとなった。実時間で 2.5 秒分の計算を行った。

3.3 解析結果と考察

最大クーラン数は、いずれの解析モデルにおいても約 6.0 以下となり、 y^+ は約 140 となった。

流出水頭 H_o : 1,500 mm における管内平均流速と管内圧力の経時変化を図 11 に示す。管内平均流速において、解析値 v_a は、全体的に実験値 v_e と比べて、0.2 m/s 程度大きな値を示した。流速分布の傾向はほぼ同様であり、良好な解析結果であるといえる。また、管内圧力の再現性も、前節の解析と同様に良好であった。

サイホン排水配管トラップモデルにおける解析結果と実験値および理論値との比較を図 12 に示す。これより、解析による回帰係数は 4.26 となり、理論式の比例定数とは 4% 程度の差異がみられた。しかし、実験による回帰係数とは、極めて近い値を示した。

また、配管トラップの有無による管内流速と動水勾配の平方根との関係は、サイホン排水基本配管モデルにおいて、解析による回帰係数は 4.33 であったのに対して、サイホン排水配管トラップモデルにおいては 4.26 となり、回帰係数に若干の減少がみられた。これは、理論式の比例定数から多少の乖離が生じた結果といえる。この理由としては、本解析モデルにおける配管パターンが 6 通りと。少なかったためであると考えられる。したがって、今後はサイホン排水配管トラップモデルにおける配管パターンを増やし、データの拡充・蓄積を行う必要がある。

4. まとめ

CFD を用いてサイホン排水配管の流れ特性および管内流速式の検討を行った結果より、次の知見を得た。

サイホン排水基本配管モデルにおいて、CFD 解析は、等温・非定常流れ場、水-空気の混相流においても、再現性が良好であることが確認された。また、多様な配管形状を解析し、前報 (その 4) で導出した管内流速式の有効性が明らかになった。

サイホン排水配管トラップモデルにおいても、相当管長に配管トラップ分の損失抵抗を加えることにより、動水勾配の考え方をういた流速式が有効であることが認められた。しかし、CFD 解析による回帰係数は、理論式の比例定数から多少の乖離がみられた。これは、同解析モデルの配管パターンが少なかったためと考えられる。したがって、配管パターンの拡充が急務であるといえる。

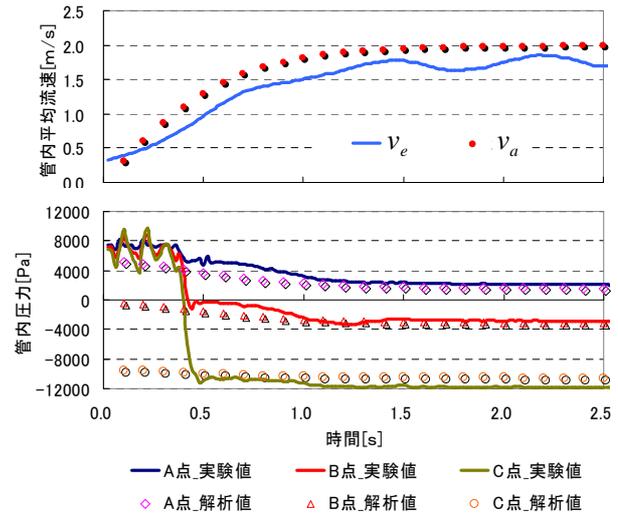


図 11 サイホン排水配管トラップモデルの流れ特性の
実験と解析の比較(水平管長: 4,000 mm、流出水頭: 1,500 mm)

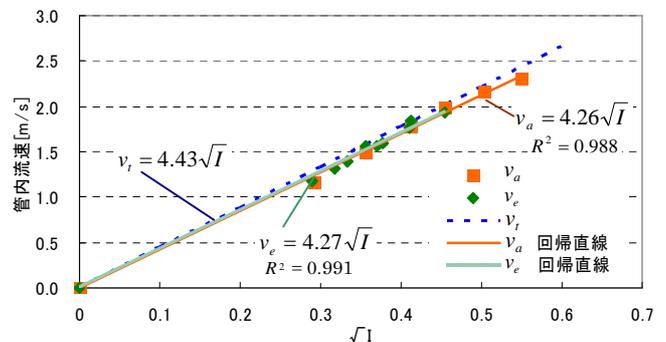


図 12 動水勾配 I の平方根と $v_a \cdot v_e \cdot v_i$ の比較
(サイホン排水配管トラップモデル)

また、本報では、CFD を用いて清水 (水-空気 2 相流) による流れ特性について検討を行ったが、実際の雑排水では、排水に含まれる固形物および水の粘性変化によって、流れ特性が変化することが予測される。これに関し、今後は、実際の排水状態に近い雑排水 (水-空気-雑物 3 相流) による流れ特性についても検討を行い、流れ特性や固形物の管内滞留の傾向を把握する必要があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 小清水謙之、他：サイホン排水システムに関する実験的研究 (その 4) 配管トラップ・跨ぎ配管を設置した場合の流れ特性に関する検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2008、投稿中)
- 2) 村上周三：CFD による建築・都市の環境設計工学、東京大学出版会、(2000)
- 3) J.H.ファーツィガー、他：コンピュータによる流体力学、シュプリンガー・フェアラーク東京、pp377-394、(2003)
- 4) C.W. Hirt et al : Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries、J-Comput.Phys.、pp39-201、(1981)
- 5) 空気調和・衛生工学会編、給排水・衛生設備計画設計の実務の知識、オーム社、(1995)